



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

POKROČILÉ FILAMENTY PRO FDM/FFF 3D TISK

ADVANCED FILAMENTS FOR FDM/FFF 3D PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kučera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Jan Kučera**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Pokročilé filamenty pro FDM/FFF 3D tisk

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozvoj a rozšíření FDM/FFF tisku v posledních letech přinesl také neustálé rozšiřování palety materiálů, které se v tomto odvětví 3D tisku využívají. Nejsou to už jen běžné materiály jako ABS nebo PLA, ale materiály s vylepšenými mechanickými, ale i s jinými speciálními vlastnostmi. Tím, jak vývoj v této oblasti probíhá rychle, je velmi přínosné vytvořit přehled těchto nových materiálů (a jejich použití).

Typ práce: rešeršně syntetická.

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je vytvoření přehledu, analýza a kategorizace speciálních materiálů pro FDM/FFF 3D tisk.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- zpracovat přehled pokročilých filamentů pro FDM/FFF 3D tisk,
- kategorizovat nalezené materiály,
- analyzovat použitelnost, přínosy a omezení těchto materiálů na základě vědeckých studií,
- provést syntézu informací a nalézt trendy v dané oblasti.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonцени/>.

Seznam doporučené literatury:

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HOTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Cincinnati: Hanser Publications, [2016]. ISBN 978-1-56990-582-1.

RYAN, Kirstie R., Michael P. DOWN a Craig E. BANKS. Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications. Chemical Engineering Journal [online]. 2021, 403(January 2021), 1-19 [cit. 2020-10-22]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2020.126162.

FAFENROT, Susanna, Nils GRIMMELSMANN, Martin WORTMANN a Andrea EHRMANN. Three-Dimensional (3D) Printing of Polymer-Metal Hybrid Materials by Fused Deposition Modeling. Materials [online]. 2017, 10(10) [cit. 2020-10-22]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10101199.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o problematice FDM/FFF 3D tisku se zaměřením na rychle se vyvíjející filamenty a jejich využití v průmyslu. Cílem práce je zobrazit velké množství filamentů, které byly testovány a kategorizovat je do jednotlivých skupin pro budoucí použití. Vybrané testované materiály z vědeckých studií řeší jak mechanické vlastnosti jednotlivých čistých filamentů, tak i vliv přísad k těmto filamentům. Jedna z často používaných přísad jsou uhlíkové vlákna. Studie těchto prací pak prokázaly, že vliv uhlíkového vlákna se liší podle druhu základního materiálu a hmotnostního procenta vyplnění. Z praktického hlediska lze výsledky této práce použít při samotné volbě materiálu pro tisk vlastních modelů a prototypů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aditivní technologie, FDM, FFF, 3D tisk, Mechanické vlastnosti, Pokročilé materiály

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the issue of FDM/FFF 3D printing with a focus on rapidly evolving new filaments and their use in industry. The aim of this work is to display a large number of filaments that have been tested and to categorize them into individual groups for future use. Selected tested materials from scientific studies address both the mechanical properties of individual pure filaments and the effect of additives to these filaments. The analysis of these works then showed that the effect of carbon fiber varies according to the type of base material and the weight percentage of filling. From a practical point of view, the results of this work can be used in the choice of material for printing models and prototypes for own usage.

KEYWORDS

Additive technologies, FDM, FFF, 3D printing, Mechanical properties, Advanced materials

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUČERA, J. *Pokročilé filamenty pro FDM/FFF 3D tisk*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 42 s. Vedoucí diplomové práce Tomáš Koutecký.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Kouteckého, PhD a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Jméno a přímení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především vedoucímu práce panu Ing. Tomáši Kouteckému, PhD za vstřícný přístup, ochotu a podporu k bakalářské práci. Dále chci poděkovat skupině ochotných Čerpadelníků, bez jejichž pomoci bych to nezvládl.

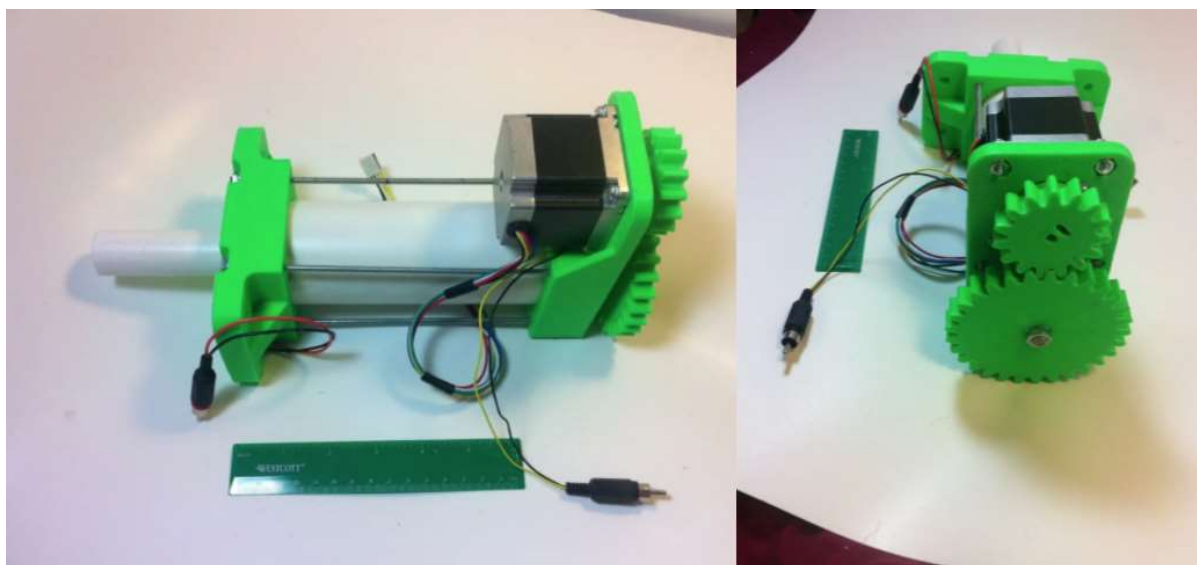
OBSAH

Úvod	10
1 Analýza problému a cíl práce	11
1.1 Analýza problému	11
1.2 Cíl práce	11
2 Přehled současného stavu poznání	12
2.1 Přehled technologií 3D tisku	12
2.1.1 FDM	13
2.2 Mechanické testování	15
2.3 Materiály pro FDM/FFF 3D tisk	17
2.3.1 ABS	17
2.3.2 ABS s uhlíkovými vlákny	18
2.3.3 ABS + VGCF	18
2.3.4 ABSi	19
2.3.5 ASA	20
2.3.6 PLA	21
2.3.7 PLA s uhlíkovými vlákny	21
2.3.8 PLA s dřevěným, měděným a hliníkovým vláknem	22
2.3.9 NYLON	22
2.3.10 Nylon s uhlíkovými vlákny	23
2.3.11 PEEK	24
2.3.12 PEEK s uhlíkovými vlákny a skleněným vláknem	24
2.3.13 TPE	26
2.3.14 PET/PET-G	27
2.3.15 PC	28
2.3.16 PC + PLA + Uhlíkové vlákno	28
3 Diskuze	30
Závěr	33
Seznam použitých zkratk a symbolů	39
Seznam obrázků	40
Seznam tabulek	41
Seznam příloh	42

ÚVOD

3D tisk je proces, při kterém vzniká model postupným nanášením vrstev materiálu, které se vzájemně spojují. V oblasti aditivní výroby patří 3D tisk s technologií FDM (Fused Deposition Modeling) a FFF (Fused Filament Fabrication) mezi absolutní špičky ve svém oboru. Zásahu v tom má nejenom nízká cena, díky které si tiskárnu může pořídit kdejaký kutil, ale také díky své jednoduchosti. Rozvoj a rozšíření FDM/FFF tisku v posledních letech přinesl také neustálé rozšiřování palety materiálů, které se v tomto odvětví 3D tisku využívají. Nejsou to už jen běžné materiály jako ABS nebo PLA, jako tomu bylo za počátku, ale materiály s vylepšenými mechanickými, ale i s jinými speciálními vlastnostmi.

Rostoucí popularitu má na svědomí velké množství výrobců tiskáren a plastových strun, díky čemuž klesla počáteční cena domácích tiskáren a tudíž i narostl zájem o tuto technologii. V současnosti slouží 3D tisk především k rychlé výrobě prototypu modelu, na kterém se simuluje pracovní zatížení a namáhání. Pokud model z technického hlediska obstojí, součást může být uvedena do provozu. Skvělým příkladem jsou například tisknutá ozubená kola na obrázku 1, využitá pro lineární pohon zařízení, použitý pro pohyb robotů.



Obr. 1) Lineární pohon s vysokým zatížením [16]

Na rozdíl od konvenčních způsobů výroby, lze 3D tiskem vyrábět i velmi komplikované tvary, které by nebylo možno vytvořit například třískovým obráběním. Dalším častým použitím je výroba náhradních dílů při nečekané poruše, či nedostupnosti dílů na trhu. S rostoucí popularitou ze strany firem a domácích fajnšmekrů, musejí dodavatelé neustále vyvíjet nové filamenty, které obstojí nároky jak technického rázu (mechanické vlastnosti, trvanlivosti) tak i designového. Tato práce se bude zabývat tímto vývojem, mechanickými vlastnostmi, přísadami a následnou kategorizací těchto filamentů pro FDM/FFF tisk.

1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

1.1 ANALÝZA PROBLÉMU

V posledních letech přinesl vývoj v oblasti aditivní výroby velké množství studií, které se snaží inovovat dosavadní filamenty, anebo vytvořit nové a pokročilejší filamenty. Tyto nové studie nejsou nijak kategorizovány a přeloženy pro společnost, proto se v této práci autor zabývá jejich rozřazením podle společných vlastností. Především pak v oblasti mechanických vlastností vytisknutých vzorků, které se dále dají využít pro určitou oblast výroby.

Nejprve bude nutné vytvořit přehled používaných filamentů pro 3D tisk a z něj vybrat takové, které se užívají ve strojírenském průmyslu. U takto vybraných materiálů se následně hledají výzkumné články, umožňující rozšířit znalosti mechanických vlastností daného filamentu.

1.2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem práce je vytvoření přehledu, analýza a kategorizace speciálních materiálů pro FDM/FFF 3D tisk.

Dílčí cíle bakalářské práce:

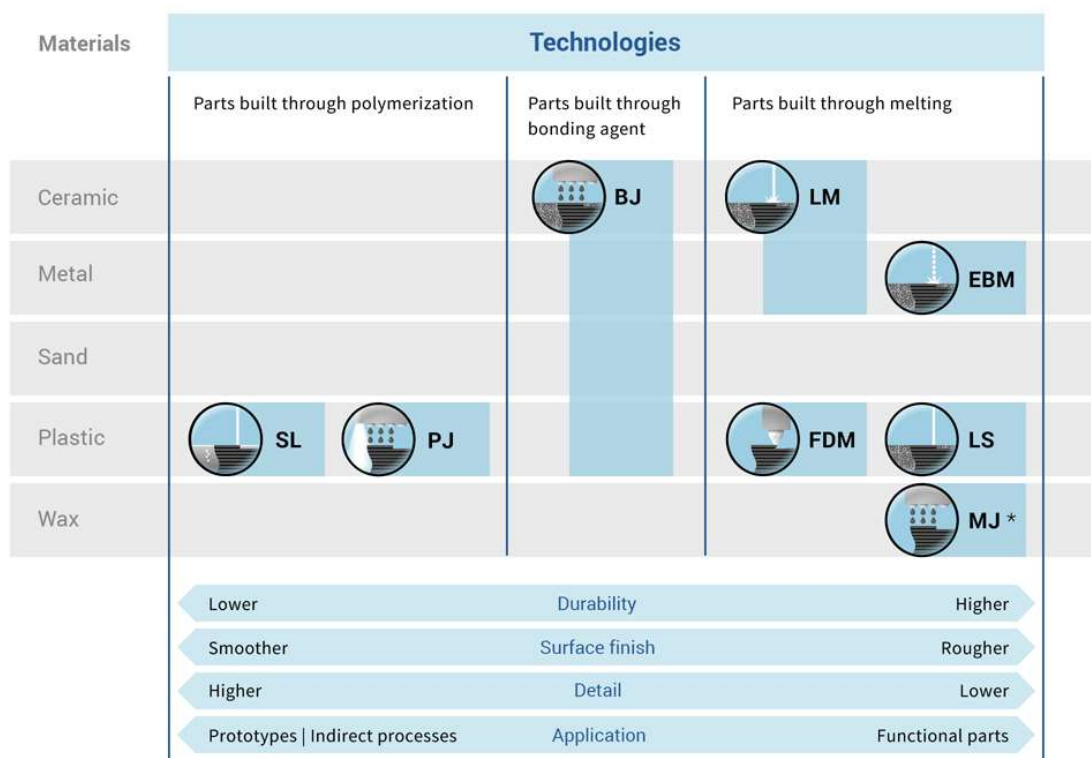
- zpracovat přehled pokročilých filamentů pro FDM/FFF 3D tisk,
- kategorizovat nalezené materiály,
- analyzovat použitelnost, přínosy a omezení těchto materiálů na základě vědeckých studií,
- provést syntézu informací a nalézt trendy v dané oblasti.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Proces 3D tisku se skládá z několika na sobě navazujících etapách, počínaje u vytvoření 3D modelu. Pro práci na tiskárně je nutné, aby program rozdělil 3D model na jednoduché, na sebe naskládané 2D vrstvy. Ten pak automaticky vypočítá a rozdělí model na vrstvy a navrhne je tak, aby byl tisk uskutečnitelný. Pro vytvoření modelu existuje bezpočet softwarů, kupříkladu AutoCAD, Tinkercad, OpenSCAD a mnoho dalších, popřípadě se využívá 3D skeneru. Vytvoření takového modelu může trvat v rozmezí několika hodin, až po celé dny, záleží především na složitosti a komplexnosti modelu. Z takto vytvořeného modelu následně vytvoříme specifické instrukce pro tiskárnu, tzv. G-kód. Ten se posílá do tiskárny a ta podle něj pracuje.

2.1 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ 3D TISKU

Za dobu vývoje 3D tisku vzniklo nespočet návrhů tiskáren, které pracují na různých principech. Mezi takové se řadí například FDM, FFF, SLA, SLS a mnoho dalších. Následující obrázek 2-1 popisuje jednotlivé metody s ohledem na životnost součástek, vlivu metody na povrchu součásti, detailování a aplikace hotového modelu a také se zabývá pracovním materiálem a funkčním spojením.



Obr. 2-1) Přehled technologií [18]

Vidíme, že většina metod je využívána pro jeden druh materiálu, pouze se dvěma výjimkami. Jednou z nich je tzv. Binder Jetting (BJ), pracující ve formě prášku nanášeného na pracovní plochu, který je spojován vystřikovaným pojivem z tiskové hlavy. Výsledný výrobek je tak tvořen slepováním jednotlivých částic prášku.

Další zajímavou metodou, je tzv. Selective Laser melting (LM). Metoda pracuje taktéž s vrstvou práškového materiálu naneseného na pracovní plochu, na kterou se soustředí laserový paprsek a taví prášek. Hotová vrstva se následně pokryje dalším práškem a proces se opakuje.

V následující tabulce je aktuální porovnání těchto nejčastěji využívaných technologií pro 3D tisk. Pro porovnání se pracuje s parametry tiskáren, jako jsou rychlost tisku, horizontální (x, y) a vertikální (z) posun nebo materiál, na kterém metoda pracuje.

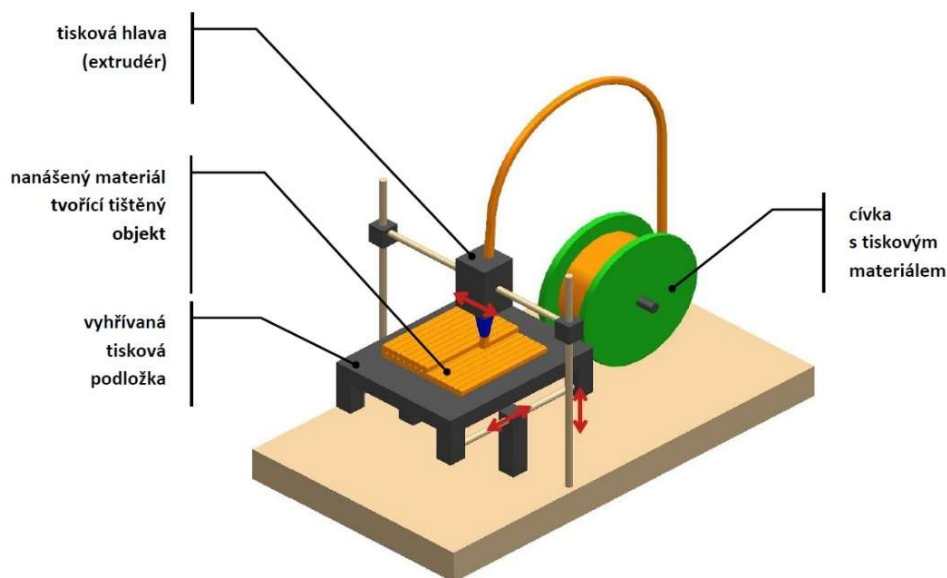
Tabulka 1: Přehled 3D technologií [1]

Technologie	Fused deposition modeling	Stereolitografie	Laser sintering	Digital light processing	Direct metal laser sintering	Binder Jetting
Rychlost metody	Pomalá	Rychlá	Střední	Rychlá	Pomalá	Rychlá
Materiál	Viz. BP	Pryskyřice	kov, keramika, písek	Pryskyřice	kov, keramika, písek	kov, keramika
Cena	Velmi levná	Velmi drahá	Drahá	Střední	Střední	Drahá
Rozlišení ve směru x,y [μ]	100	10	10	10	10	10
Rozlišení ve směru z [μ]	100	10	10	10	100	10

2.1.1 FDM

FDM (Fused Deposition Modeling) je momentálně nejrozšířenější metodou 3D tisku především díky své ceně. Její počátky sahají do roku 1989, kdy firma Stratasys tuto metodu patentovala. Stratasys po vypršení patentu ovšem metodu FDM registroval jako ochrannou známku a nadále pokračoval ve vývoji. Ekvivalentem metody FDM je tzv. FFF – Fused Filament Fabrication, na které spolupracují členové projektu RepRap a snaží se o rychlejší rozvoj dalších generací 3D tiskáren.

FDM funguje na principu tavení plastového vlákna (uloženého v zásobníku 3D tiskárny) uvnitř extruderu, který taveninu vytlačí a pohybem ve dvou osách postupně nanáší tenkou vrstvu materiálu na podložku. Tisková hlava tak tiskne vrstvu po vrstvě, dokud nevznikne předem vymodelovaný model. Ten se nechá vychladnout a následně se může odlomit od pracovní plochy. Metoda FDM nenabízí tak hladké povrchy modelů, často se proto provádí broušení nebo jiné povrchové úpravy součástí.

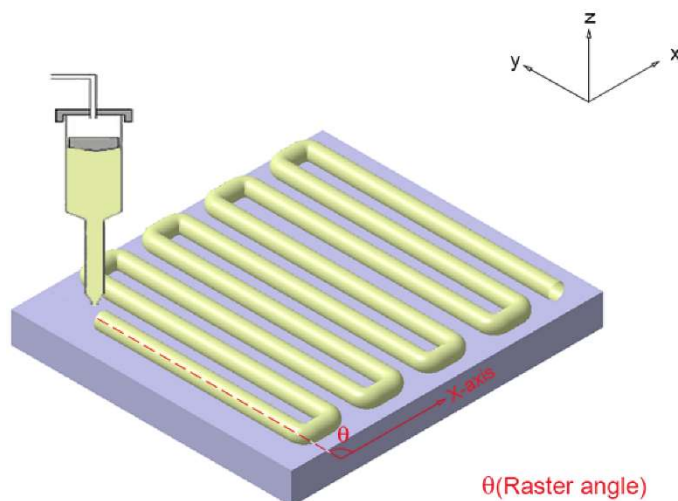


Obr. 2-2) Funkce FDM tiskárny [17]

FDM tiskárny pracují obzvláště s plastem (filament) a jeho přísadami. Filament pro 3D tisk je speciálním typem plastů, které se nazývají termoplasty. Jakmile se termoplasty zahřejí na správnou teplotu tání, stanou se pružnými a poddajnými. Existuje mnoho typů filamentů s různým složením a vlastnostmi. Filamenty jsou běžně dostupné ve dvou standardních průměrech, 1,75 mm a 2,85 mm. Tento dokument se bude zabývat nejenom čistým plastem, ale i filamenty s přidanými prvky zlepšující mechanické vlastnosti modelu.

2.2 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ

Mechanické vlastnosti tištěných vzorků jsou ovlivňovány mnoha faktory, jako je tloušťka vrstvy nanesené tryskou na podložku, úhel tisku neboli rastrový úhel, který udává směr rastru vzhledem ke směru napětí v tiskárně (obr. 2-3), orientace sestavení, vzor výplně, vzduchové mezery a teplota tavení.



Obr. 2-3) Úhel rastru u 3D tisku [5]

Každý nově vytvořený filament prochází řadou zkoušek k určení jeho mechanických vlastností. Mnoho vědeckých studií a odborných prací se řídí stejnými pravidly a porovnávají výsledky vylepšených filamentů k základní verzi. Zkouší se především tři základní charakteristiky:

- Tvrdost materiálu,
- Pevnost v tahu,
- Houževnatost materiálu

Pro zkoušku tvrdosti se využívá zkoušky podle Brinella ISO 2039-1, kdy vtiskneme kuličku z kalené oceli do připraveného vzorku po určitou dobu a zatížení. Po uplynutí požadované doby vzorek odtížíme a měříme průměr vniknutí ve dvou vzájemně kolmých osách. Následně z naměřených hodnot získáme průměr. Pevnost je pak označována jako H a měřena v Newtonech na milimetr čtvereční [N/mm^2]. Dalším způsobem měření tvrdosti je metoda Shore, využívající stejný princip jako zkouška Brinella, kdy se vtlačí hrot tvrdoměru do testovaného materiálu. Používají se dva základní hroty, označené písmeny A a D. Hrot A se používá pro měkčí materiály [28].

	Měkký							Středně měkký							Středně tvrdý				Tvrdý				Velmi tvrdý				
A	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100						
D								6	7	8	10	12	14	16	19	22	25	29	33	39	46	58	60	70	80	90	100

Gumička

Guma
na
gumování

Pneumatika

Podrážka

Kolečko
nákupního
vozíku

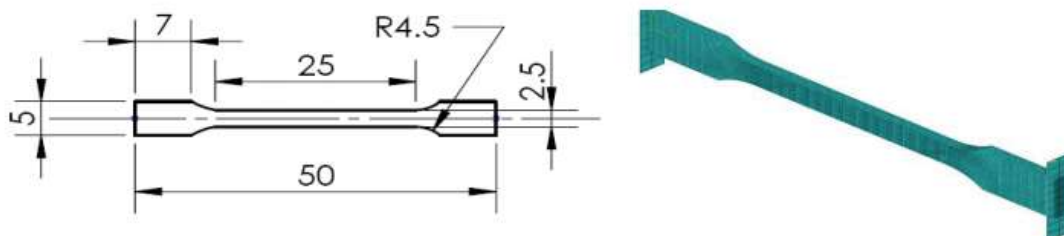
Pracovní
helma

Obr. 2-4) Tabulka tvrdosti a příklady použití [29]

Zkouška tahem je prováděna v souladu s ČSN EN ISO 527-1 dynamometrem o daném zatížení a rychlosti deformace. Princip spočívá v jednoosém namáhání zkušební vzorku, při kterém se sleduje poměrné prodloužení. Zkouška se provádí minimálně pětkrát a konečný výsledek je zajištěn zprůměrováním naměřených hodnot. Občas je zkouška prováděna podle ASTM D638 (Accredited Proficiency Testing Provider) s podobně nastavenou stupnicí zatížení.

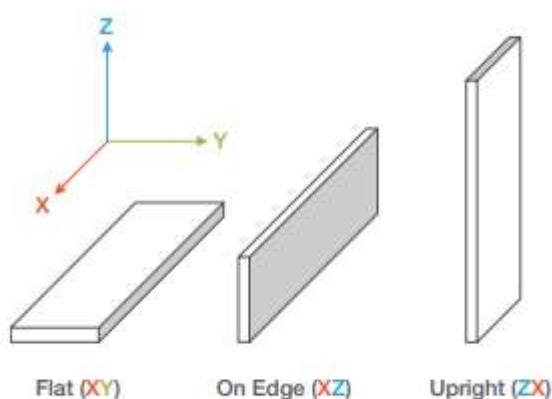
Pro zjištění odolnosti vůči nárazu se využívá Charpyho zkouška nárazu ČSN EN ISO 179-1. Cílem Charpyho zkoušky je zjištění hodnoty nárazové práce, která je potřebná k přeražení zkušební vzorku. Při nárazovém namáhání termoplastů dochází ke dvěma typům lomu, křehkému a houževnatému. Zkouška se provádí celkem pětkrát a konečný výsledek je zajištěn zprůměrováním naměřených hodnot. Po každém provedení se povrch vzorku zkontroluje a určí se druh lomu.

Na obrázku 2-5 je zobrazen zkušební vzorek, tzv. Dog-bone.

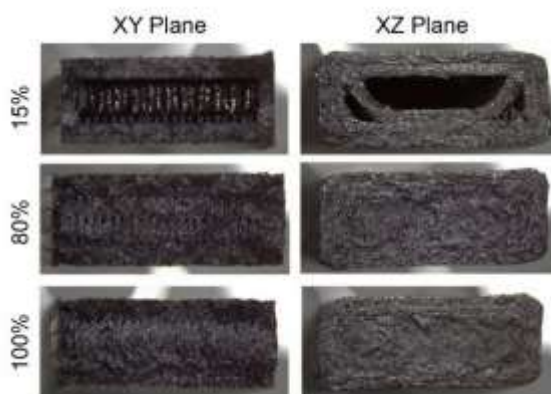


Obr. 2-5) Zkušební vzorek „Dog-bone“ [23]

Materiály určené pro 3D tisk se testují ve dvou rovinách zobrazené na obrázku 2-6, a to v rovinách XY a XZ. Testování probíhá také pro různé hodnoty vyplnění vzorku. Na obrázku 2-7 pak lze vidět vyplnění vzorku.



Obr. 2-6) Souřadný systém testovaného vzorku [23]



Obr. 2-7) Vyplnění vzorku [7]

2.3 MATERIÁLY PRO FDM/FFF 3D TISK

Dostupných materiálů pro 3D tisk je v současné době značné množství. Tyto materiály mají rozličné vlastnosti, díky kterým je každý materiál využíván v různých průmyslových odvětvích. Pro správnou volbu filamentu je zásadní, aby tiskař tyto vlastnosti znal a dokázal tak určit ideální filament.

2.3.1 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je jeden z prvních filamentů na světě 3D tisku a je dodnes velice používaný, hlavně díky jeho nízké ceně a dobrým mechanickým vlastnostem. ABS je amorfní termoplast, což znamená, že stejně jako PLA, může být opakovaně roztaven a krystalizován, aniž by došlo k znehodnocení materiálu. ABS se ovšem taví při vyšších teplotách než již zmiňovaný PLA. Vyšší teplota tavení dává ABS výbornou tepelnou odolnost. Obsahuje příměs syntetického kaučuku, díky čemuž je odolnější proti opotřebení a taky nárazům.

Tabulka 2: Pro a proti filamentu ABS

Pro	Proti
Nízká cena	Smršťování a deformování při kontaktu se vzduchem
Odolný vůči nízkým i vysokým teplotám	Nutnost vyhřívané podložky
Odolný a houževnatý	Nevhodný při dlouhodobém vystavení v povětrnostních podmínkách
Odolný vůči kyselinám, hydroxidům, uhlovodíkům, olejům	Náchylný na změnu teplot
Lehce opracovatelný	Při tavení doporučené větrání, vydává pronikavý zápach

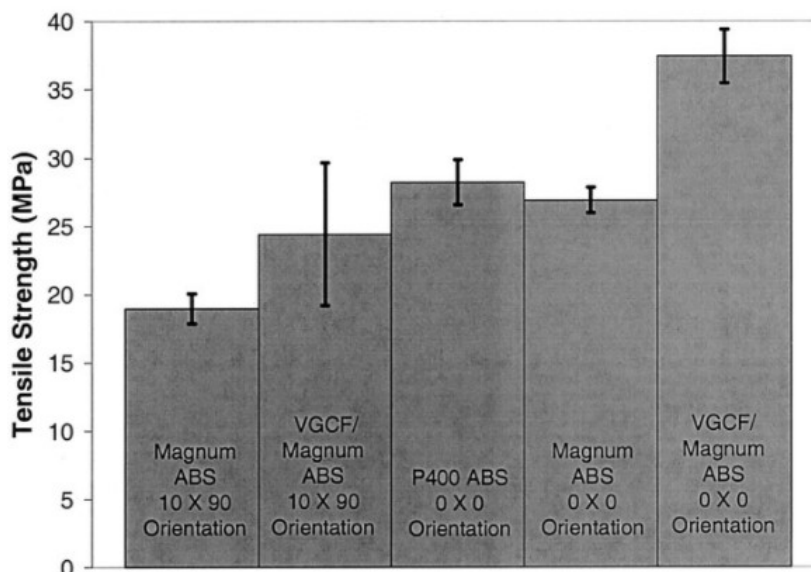
2.3.2 ABS s UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Uhlíková vlákna jsou v posledních letech často přidávána do základního filamentu za účelem zlepšení pevnosti a tuhosti, chemické a tepelné odolnosti a elektrické vodivosti a to nejenom pro ABS, ale také u jiných filamentů (PLA, Nylon). Pro ABS vypracoval studii F. Ning a členové jeho týmu [20], kde experimentují s různými hodnotami uhlíkového vlákna v ABS filamentu. Zkoušky byly provedeny podle předem zmiňovaných mechanických zkoušek.

Ve srovnání se vzorkem z čistého ABS vyšlo najevo, že přidáním uhlíkového vlákna zvýší pevnost v tahu a mez pružnosti (Youngův modul), ale zároveň sníží houževnatost a mez v kluzu. Největší střední hodnotu v pevnosti v tahu z porovnávaných vzorků má vzorek s 5% uhlíkového vlákna, vzorek s 7,5% má pak největší hodnotu v mezi pružnosti. Test pevnosti v ohybu se provedl jen pro základní filament a filament s přidáním 5% uhlíkového vlákna.

2.3.3 ABS + VGCF

ABS s přísadou VGCF (Vapor-grown carbon fibers) se vytváří vystavením částic kovového katalyzátoru, obvykle železa, o průměru několika nanometrů, k přesycenému plynu uhlíku. Za těchto podmínek mohou částice katalyzátoru rychle produkovat prodlužující se uhlíková vlákna, které při spojení s ABS tvoří kompozitní materiál pro FDM tisk. Vytvořený filament je pak unikátní z hlediska výhodných tepelných, vodivých a mechanických vlastností.



Obr. 2-8) Pevnost v tahu ABS + VGCF při různé rotaci [5]

Na obrázku 2-8 jde jasně vidět zlepšení pevnosti v tahu filamentu s přidaným prvkem vzhledem k neplněnému ABS. Při testování vzorků se taktéž ukázalo, že dochází k drastickému snížení prodloužení do momentu porušení, což má na svědomí změna druhu lomu z houževnatého na křehký. Křehké chování filamentu je způsobeno nízké odolnosti vůči vytahování vláken a snížené fúze mezi jednotlivými vrstvami.

2.3.4 ABSi

ABSi je filamentem od firmy Stratasys. Vhodný pro koncepční modelování a prototypy hotového výrobku. Největší předností oproti čistému ABS je průsvitnost materiálu. Díky tomu lze sledovat chování toku materiálu a přenosu světla, nejčastěji užívané ve zdravotnictví a automobilové výrobě.

SHRNUTÍ ABS

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti ABS

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Youngův modul (GPa)	Zdroj
ABS	33	61	2,5	4,1	1,9	[21]
ABS + 3% C	39	-	-	4	2,1	
ABS + 5% C	42	66	4,4	3,4	2,4	
ABS + 7,5% C	40	-	-	3	2,5	
ABS + 10% C	34	-	-	2,7	2,2	
ABS + 15% C	36	-	-	3	2,3	
ABS+VGCF	37,4	-	1,3	5	0,8	[5]
ABSi	37	62	1,92	4,4	1,9	[22]

2.3.5 ASA

Akrilonitril-styren-akryl (ASA), byl vytvořen jako alternativa k ABS. Mezi jeho přednosti patří zejména odolnost proti povětrnostním podmínkám a odolnost vůči zažloutnutí od UV záření, tudíž je často používán pro venkovní díly. ASA patří mezi cenově dostupné filamenty, a zároveň prokazuje dobré mechanické vlastnosti. Hlavní nevýhodou filamentu je pak silné kroucení způsobené teplotními rozdíly mezi modelem a okolí tiskárny. Nejjednodušší cestou pro snížení kroucení je pak vytvoření „zdi“ okolo tisknutého modelu. To zaručí snížení chladného proudění vzduchu kolem modelu. Ve strojírenském průmyslu se často užívá pro upínací přípravky, koncové nástroje, popřípadě pro montážní prvky. Dále jej můžeme najít jako funkční komponenty u automobilového či vojenského průmyslu.



Obr. 2-9) ASA komponenty domácí větrné turbíny [31]

Tabulka 4: Pro a proti filamentu ASA

Pro	Proti
Vysoká nárazová odolnost	Náročnější tisk
Chemická odolnost	Při tavení vypouští zápachající výpary
Odolnost vůči UV záření	

SHRNUTÍ ASA

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti ASA

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Youngův modul (GPa)	Zdroj
ASA	45,4	68,9	2,2	33	2	[26]

2.3.6 PLA

Polyactic Acid (PLA) je jeden z nejčastěji používaných filamentů pro FDM tisk. PLA je přírodní rozložitelný termoplastický polyester, který je získáván z obnovitelných zdrojů, jako je kukuřičný škrob, brambory nebo cukrová třtina. Tento filament disponuje skvělou tisknutelností a vysokou tvrdostí, zároveň je ale velmi křehký. Výsledný filament je doporučován začínajícím tiskařům, zejména kvůli nízké ceně, nenutnosti vyhřívané podložky anebo malé teplotě pro tisk (měkký již při teplotě 60°C). Studie [45] pracovala s různou teplotou tisku jednotlivých vzorků, hodnoty v tabulce 6 jsou uváděné pro doporučený tisk při 210° C.

Tabulka 6: Pro a proti filamentu PLA

Pro	Proti
Nízká cena	Horší mechanické vlastnosti oproti ostatním filamentům
Bez škodlivých výparů při tisku	Časová degradace
Nedeformuje se při tisku	Méně odolný vůči vysokým teplotám
Dobrá trvanlivost	Křehkost
Lesklejší a hladší vzhled	

2.3.7 PLA S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Provedená studie [23] byla zaměřena na mechanické vlastnosti PLA s dlouhým uhlíkovým vláknem o průměrné délce 4,6 mm. Zkoušky byly provedeny podle předem zmiňovaných mechanických zkoušek.

Výsledky tahových zkoušek ukazují značné zlepšení pevnosti v tahu pro filament s přidaným uhlíkovým vláknem až do 7,5%. Ve srovnání s čistým polymerem PLA se pevnost v tahu zvýšila až o 90%. Toto zlepšení je připisováno dlouhým vyztuženým uhlíkovým vláknům použité při výrobě filamentu. Dále je vidět značný pokles pevnosti v tahu při výplni vyšší jak 7,5%, za což může větší pórovitost způsobená dutinami kolem rozhraní vláken s matricí. Podobné vlastnosti vykazuje jak Youngův modul, tak i pevnost v ohybu s výjimkou 15% plnění.

2.3.8 PLA S DŘEVĚNÝM, MĚDĚNÝM A HLINÍKOVÝM VLÁKNEM

Ve výzkumné práci [46] se testovalo mechanické chování kompozitních dílů PLA na bázi dřeva (DV), mědi (MV) a hliníku (HV). Většina testovaných kompozitních materiálů vykazuje podobné nebo dokonce zlepšené mechanické vlastnosti oproti čistému PLA. Vzorky z dřevěného vlákna pak vykazují výrazné zhoršení mechanických vlastností oproti základnímu filamentu. To je způsobeno špatnou přilnavostí mezi jednotlivými vrstvami vzorku a pórovitostí vytisknutých modelů.

SHRNUTÍ PLA

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti PLA

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Youngův modul (GPa)	Zdroj
PLA	42,4	69,7	2,1	6	0,7	[46]
PLA + 2,5% C	31,7	51,1	1,8	3,2	1,7	[23]
PLA + 5% C	44,8	56,2	1,8	3,2	2,3	
PLA + 7,5% C	39,9	43,4	2	2,8	2,4	
PLA + 10% C	24,7	32,2	1,2	2	2,1	
PLA + 15% C	26,9	57,6	2,9	1,7	2,1	
PLA + DV	29,5	40,4	1,7	5	0,65	[46]
PLA + MV	40,3	55,5	2,17	5	1	[46]
PLA + HV	40,2	62,8	2,5	7	0,84	[46]

2.3.9 NYLON

Nylon neboli polyamid, se těší velké oblíbenosti ve společnosti. Tento syntetický kopolymer je používán hlavně pro své mechanické vlastnosti. Nylon je velmi pevný a zároveň flexibilní a odolný při nárazech a každodenním užívání. Mechanickými vlastnostmi převyšuje jak PLA, tak i ABS. Nylonové filamenty mají výbornou adhezi mezi vrstvami a díky tomu se model zpevní. Pro FDM tisk se nejčastěji používají 3 základní druhy nylonového vlákna, Nylon 6, Nylon 6/6 a Nylon 12.

Nylon má velmi nízký součinitel tření a zároveň vysokou teplotu tání, díky čemuž je také velmi vhodnou volbou pro tisk funkčních a technických dílů, jeho využití můžeme najít například v automobilovém průmyslu, kde je používán jako výztuž pneumatik, popřípadě pro pouzdra převodů.

Při práci s nylonovými vlákny musíme mít v úvahu, že minimální teplota tavení se uvádí jako 240°C, kterou z větší části nezvládá žádná levná domácí tiskárna. Spolu s tím přichází další problém, a to smršťování při východu materiálu z trysky. Tomu zabrání přehřátá podložka (okolo 80°C), často používaná podložka ze skla pro lepší rozložení tepla.

Tabulka 8: Pro a proti filamentu Nylon

Pro	Proti
Nízká cena	Vysoká teplota tavení
Flexibilita využití	Nutnost vyhřívání podložky
Rázová houževnatost	Smršťování při kontaktu se vzduchem
Výborné vrstvení	Při tavení vypouští toxické výpary
Odolný proti chemikáliím a odření	Absorbuje vlhkost, vynucuje kvalitní uskladnění

2.3.10 NYLON S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

Z testů prováděných ve studii [4] se zjistilo, že přidáním uhlíkových vláken o průměru 5 až 10 mikrometrů k základnímu filamentu výrazně zvýšíme pevnost v tahu a pružnost finálního produktu. Dále bylo zjištěno, že přidáním uhlíkových vláken se zmenší desorientace vnitřního složení vytisknutého filamentu, a tím se zvýší tepelná vodivost ve srovnání se základním filamentem. Další výhodou přidaného aditiva je znatelné snížení křehkosti, a to i při teplotách pohybující se okolo -20°C.

V následujícím obrázku 2-10 porovnáváme hodnoty získané zkouškou tahem u několika používaných druhů nylonového filamentu s uhlíkovými vlákny.

Manufacturer Data	Young's Modulus E [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{break} [MPa]	Elongation at Break [%]	Energy at Break [J]
Injection moulded–Nylon Carbon	6000	100	-	-	-
Nylon 12CF (Stratasys)	7515 (100%, XZ)	63.4 (100%, XZ)	76 (100%, XZ)	1.9 (100%, XZ)	-
Nylon Carbon (Fiber Force)	1844 (15%, XY)	-	33.7 (15%, XY)	5.7 (15%, XY)	5.45 (15%, XY)
	2758 (100%, XY)		66.3 (100%, XY)	6.7 (100%, XY)	12.2 (100%, XY)
CF112 (Fillamentum)	2200	52.4	37.7	8	-
Nylon (Stratasys)	1282 (100%, XZ)	32 (100%, XZ)	46 (100%, XZ)	3.0 (100%, XZ)	-
Nylon (Fiber Force)	881.9 (15%, XY)	-	20.7 (15%, XY)	13.94 (15%, XY)	10.48 (15%, XY)
	1529.0 (100%, XY)		41.1 (100%, XY)	31.30 (100%, XY)	49.70 (100%, XY)
Nylon (Markforged)	940	54			

Obr. 2-10) Porovnání tahových vlastností nylonových filamentů [4]

Filament Nylon Carbon (Fiber Force) je k čistému nylonovému filamentu přidáno 20% karbonových vláken, u CF112 (Fillamentum) je to 35%. Poslední tři filameny jsou nylonové vlákna od různých distributorů.

Uhlíkové vzorky vykazují lepší mechanické vlastnosti oproti čistým vzorkům, Nylon Carbon má až o 61% vyšší pevnost v tahu v ose XY než Nylon (Fiber Force). Vstříkované vzorky (Injection moulded) vykazují nejvyšší hodnoty mechanických vlastností.

SHRNUTÍ NYLON

Tabulka 9: Mechanické vlastnosti Nylonu

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Youngův modul (GPa)	Zdroj
Nylon 6	40	95,4	1	60	-	[36]
Nylon 6/6 [26]	45	76,6	0,85	60	-	[26]
Nylon 12 PA	52	67	1	20	1,4	[40]
Nylon 12 CF	76	-	-	1,9	7,5	[4]

2.3.11 PEEK

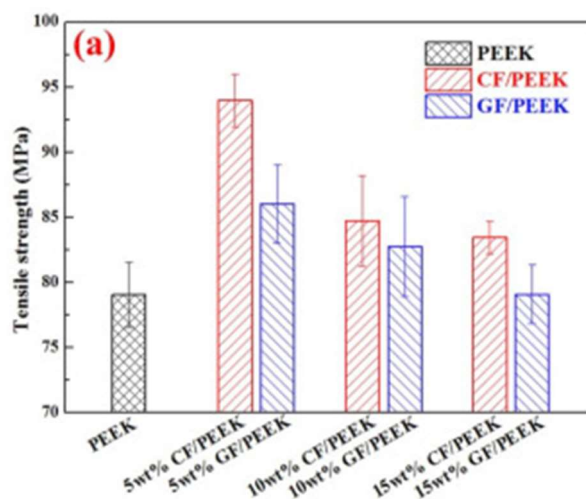
PolyEtherEtherKetone (PEEK) je polykrystalický termoplastický materiál, který byl vytvořen britskou společností Imperial Chemical Industries (ICI) roku 1977. PEEK se začal aktivně využívat ve 3D tisku až po vypršení patentů pro vyhřívané komory, do té doby se s ním pracovalo především u vstřikování. Hlavními přednostmi filamentu je jeho vysoká tepelná odolnost, která se hojně využívá v leteckém průmyslu. Pro srovnání, PEEK je schopný odolávat stálé teplotě až do 250°C, zatímco obvyklé ABS produkty vydrží průměrně jen do 100°C. Filament je biologicky rozložitelný.

Tabulka 10: Pro a proti filamentu PEEK

Pro	Proti
Pevný	Náchylnost k ohybu při tisku
Velmi dobré tlumení vibrací	Špatná přilnavost k podložce
Odolný vůči nárazu	Cena
Vysoký koeficient tření	

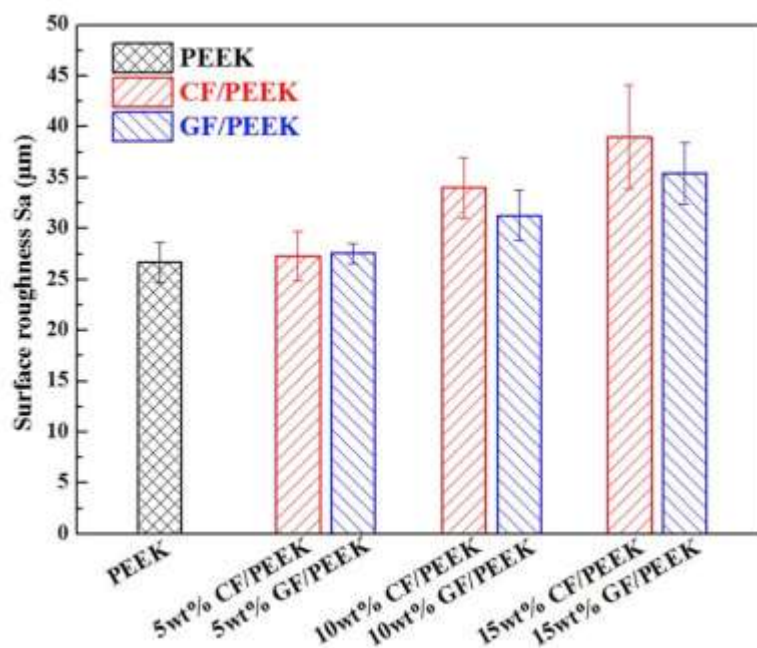
2.3.12 PEEK S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY A SKLENĚNÝM VLÁKNEM

Ve studiích [24][25] se pracovalo s modifikovaným PEEK filamentem o krátká uhlíková a skelná vlákna se zaměřením na jejich význam pro mechanické vlastnosti a kvalitu povrchu. Jako základní filament pro studie byl použit PEEK 450G.



Obr. 2-11) Pevnost v tahu v závislosti na druhu filamentu [24]

Pevnost v tahu kompozitních vzorků významně vzrostla oproti základnímu filamentu. Při větším plnění začíná opět klesat, což pravděpodobně způsobila zvýšená pórovitost kompozitních vláken ve vzorku. Nejvýraznější zvýšení tahových vlastností je u PEEKu s 5% vyplnění uhlíkovým vláknem, který má maximální pevnost 94 MPa. Největší pevnost v ohybu je pak pro 5% vyplnění skelným vláknem a to 165 MPa.



Obr. 2-12) Drsnost povrchu [24]

Na obrázku 2-12 je srovnání drsnosti v čistém PEEK filamentu s ostatními. Lze zpozorovat, že se měřená drsnost tištěného povrchu po překročení 5% kompozitních materiálů zvýší a povrch se stane drsnějším.

SHRNUTÍ PEEK

Tabulka 11: Mechanické vlastnosti PEEK

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Youngův modul (GPa)	Zdroj
PEEK	78	141	-	9,2	-	[24]
PEEK + 5% CF	94	156	-	2,9	-	[25]
PEEK + 10% CF	85	151	-	2,5	-	
PEEK + 15% CF	83	147	-	2,8	-	
PEEK + 5% GF	86	165	-	3,3	-	
PEEK + 10% GF	83	152	-	2,7	-	
PEEK + 15% GF	79	151	-	2,4	-	

2.3.13 TPE

Jedná se o termoplastické elastomery, které jsou vyrobeny ze směsi tvrdých plastických polymerů a měkkých gumových materiálů. TPE je nejenom velmi flexibilním materiálem, ale také má dobrou odolnost proti nárazu a dobré protiskluzové vlastnosti. Flexibilita může být velmi žádoucí vlastností hotového modelu, zároveň však dělá tisk tohoto filamentu velmi náročný. TPE, popřípadě TPU (Termoplastický polyuretan), se může při náhlém nárazu či trvalém zatížení deformovat a vrátit do původních rozměrů bez jakéhokoliv poškození. Díky tomu je TPE vhodným materiálem pro funkční součásti, které pravidelně zachycují nárazy a vibrace.

Častým problémem při tisku TPE je jeho náchylnost k boulení a snadnému ohybu uvnitř sestavy extruderu. Při tisku TPE se proto nepoužívají FDM tiskárny, které mají ostré zatačky nebo neobvyklou cestu pro pohyb vlákna.

Tabulka 12: Pro a proti filamentu TPE

Pro	Proti
Flexibilita	Náchylnost k ohybu při tisku
Velmi dobré tlumení vibrací	Špatná přilnavost k podložce
Odolný vůči nárazu	
Vysoký koeficient tření	

SHRNUTÍ TPE

Tabulka 13: Mechanické vlastnosti TPE

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Youngův modul (GPa)	Zdroj
TPE	17	2,4	0,03	550	0,015	[27]

2.3.14 PET/PET-G

Polyeténtereflatát (PET) je materiál na bázi polyesteru, který prokazuje velmi dobré mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti s dobrou chemickou odolností. PET má dále nízkou absorpci vlhkosti a dobré tokové vlastnosti, díky čemuž je vhodným filamentem pro vodotěsné nádoby a součásti. PET lze použít k výrobě pevnějších nástrojů jako alternativu k ABS, například jako formy na tvarování za tepla a k tomu patřící přípravky. Filament je také použitelný pro elektronické aplikace vyžadující dobrou tepelnou odolnost a tvarovou stabilitu, například jako světelné rámy nebo pouzdra.

Polyeténtereftalát – glykol (PET-G) je pak upravená verze PET s přidaným glykolem, který se přidává k materiálové kompozici během polymerace. Ten má pak na rozdíl od ostatních filamentů velmi dobrou odolnost vůči kyselinám a rozpouštědlům.

Tabulka 14: Pro a proti filamentu PET/PET-G

Pro	Proti
Formovatelnost	Nevhodný pro tisk malých součástí
Vysoká tepelná odolnost	Vlnění
Snadný tisk	Silná přilnavost k podložce
Houževnatost	

SHRNUTÍ PET/PET-G

Tabulka 15: Mechanické vlastnosti PET/PET-G

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Youngův modul (GPa)	Zdroj
PET	30	-	-	20	2,1	[39]
PET-G	50	-	-	23	2	[38]

2.3.15 PC

Polykarbonát (PC) je termoplastický polymer obsahující uhlíkové skupiny ve své struktuře. Na trhu vyčnívá pro svou odolnost vůči nárazům a průhlednost. Jedná se o lehký, ale zároveň velice pevný termoplast, vhodný pro součásti s předpokládanou dlouhou životností, jako jsou funkční prototypy.

Tabulka 16: Pro a proti filamentu PC

Pro	Proti
Tuhý a pevný	Hygroskopický
Vydrží drsné metody následného zpracování – například omílání	Vyžaduje vyšší teplotu extruderu
Průhlednost	Drahý
Lehký	

2.3.16 PC + PLA + UHLÍKOVÉ VLÁKNO

Cílem studií [9] a [33] bylo zkombinování biologicky rozložitelného polymeru s mechanickými vlastnostmi polykarbonátu do jediného materiálu. Studie [33] se zabývá i přidáním uhlíkových vláken pro ještě lepší vlastnosti výsledného filamentu. Zkoumány byly jak mechanické, tak tepelné vlastnosti. Základní použitý filament byl PLA 2003 D a PC W110. V následující tabulce 17 jsou zkušební vzorky rozděleny podle procentuálního hmotnostního složení, v tabulce 18 jsou pak pojmenovány podle skutečného složení získaného po analýze přetřhnutých vzorků.

Tabulka 17: Složení zkušebních vzorků

Samples	PLA wt %	PC wt %	CF wt %
90PLA10PC	90	10	0
90PLA10PC5CF	85	10	5
90PLA10PC10CF	81	9	10
90PLA10PC15CF	76	9	15
90PLA10PC30CF	63	7	30
50PLA50PC	50	50	0
50PLA50PC5CF	47.5	47.5	5
50PLA50PC10CF	45	45	10
50PLA50PC15CF	42.5	42.5	15
50PLA50PC30CF	35	35	30

SHRNUTÍ PC

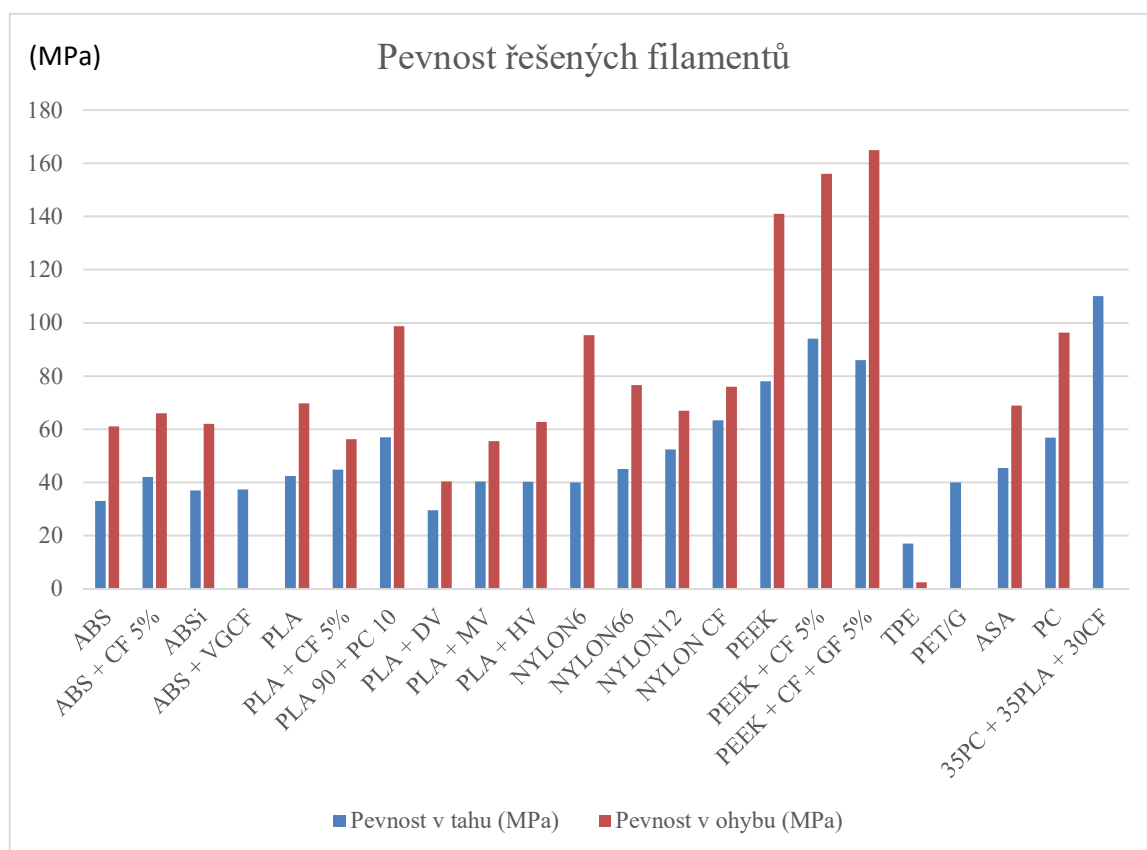
Tabulka 18: Mechanické vlastnosti PC

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Youngův modul (GPa)	Zdroj
PC	56,8	96,3	-	80	2,2	[33]
90PLA-10PC	57	98,7 [9]	-	5,4	2,33 [9]	
85PLA-10 PC-5CF	60	-	-	5	-	
81PLA-9PC-10CF	61	-	-	4	-	
76PLA-9PC-15CF	60	-	-	3	-	
63PLA-7PC-30CF	64	-	-	2	-	
50PLA-50PC	57	-	-	-	-	
50PLA-47,5PC-5CF	77	-	-	11	-	
45PLA-45PC-10CF	88	-	-	6	-	
42,5PLA-42,5PC-15CF	100	-	-	5	-	
35PLA-35PC-30CF	110	-	-	4	-	

3 DISKUZE

Jelikož je FDM široce přijímán jako jedna ze slibných technologií mezi průmyslovými oblastmi, snižují se náklady a doba vývoje tiskáren, a také existuje velké množství výzkumů nových materiálů, které lze zpracovat pomocí této technologie. Současné komerčně dostupné FDM tiskárny mají určitá omezení týkající se použití různých filamentů, které vůbec lze zpracovat. Tepelná komora prodáváných FDM tiskáren má maximální provozní teplotu okolo 300° C, což naznačuje, že touto technologií nelze zpracovat materiály s vysokou teplotou tání a nejvhodnější je proto práce především s termoplastickými polymery. V posledních letech přinesl vývoj v oblasti aditivní výroby velké množství studií, které se snaží inovovat dosavadní filamente, anebo vytvořit nové a pokročilejší filamente. Především pak v oblasti mechanických vlastností tištěných dílů, které se dále dají využít pro určitou oblast výroby.

Z výzkumných prací bylo zjištěno, že klíčovými parametry ovlivňující mechanické vlastnosti dílů vytvořených pomocí technologie FDM jsou: druh vyplnění vzorků a hmotnostní procento vyplnění, úhel rastru při tisku, tloušťka jednotlivé vrstvy tisku. Tloušťka vrstvy se uvažuje za nejdůležitější tiskárnou ovlivnitelný údaj pro pevnost v tahu. Řada používaných filamentů nemůže být tištěna bez předchozí přípravy. Pro úspěšný tisk jednotlivých materiálů je tak nutno zvážit několik možných úprav. V příloze 1 je tabulka od českého výrobce filamentů PrusaPrinters se základními informacemi ohledně tisku jednotlivých filamentů, která může být určitým vodítkem k volbě materiálu a správného nastavení tiskárny pro daný materiál.



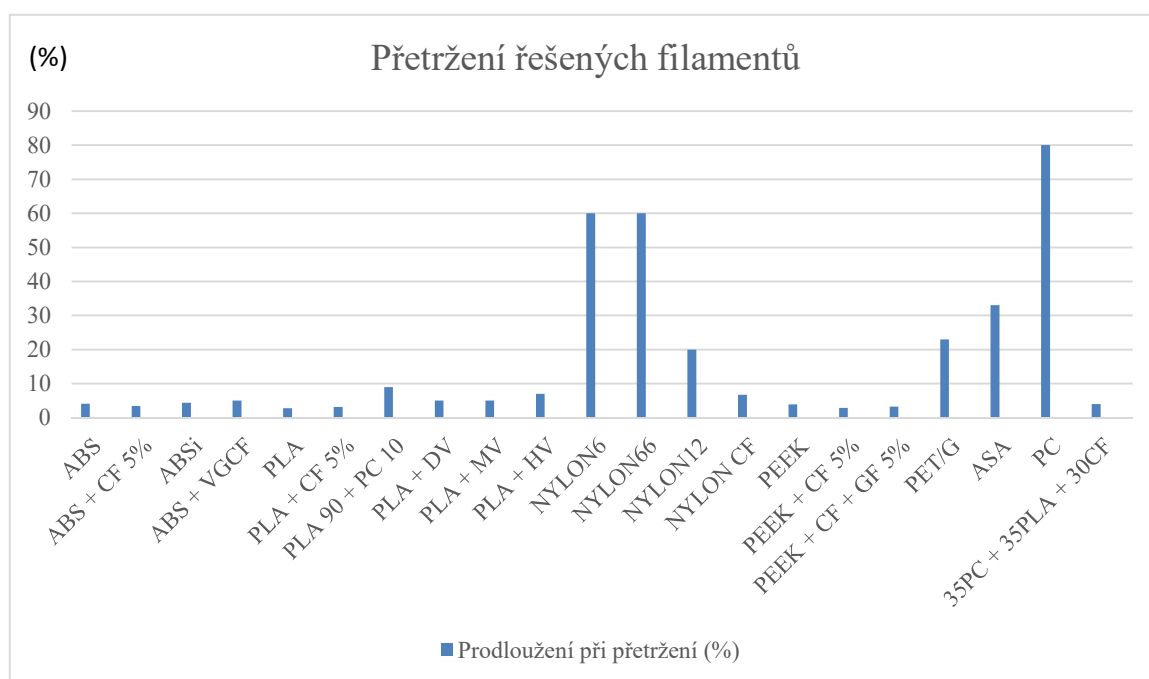
Graf 3-1: Srovnání pevnosti řešených filamentů

V grafu 3-1 jsou uvedeny řešené filamente a jejich hodnoty pevnosti v tahu a ohybu. PEEK jasně překonává ostatní filamente jak v pevnosti v tahu, tak i v ohybu. V moderní době se řada

automobilek snaží zbavovat kovových dílů a na místo toho využívá tisknuté modely z PEEKu jako náhradu. Díky mechanickým vlastnostem a teplotní odolnosti se využívá pro komponenty, jako je například těsnění, podložky, ložiska a také části pístů, případně se využívá jako náhrada za hliník v leteckém průmyslu. [49]

Uhlíkové (CF) nebo skelné (GF) vlákno se přidává do různých druhů čistého filamentu za účelem zlepšení mechanických vlastností. Z grafu 3-1 lze vyčíst pevnostní zlepšení filamentů posílených o uhlíková vlákna oproti základní verzi. Účinek uhlíkového vlákna na Youngův modul se u materiálů testovaných pro tento údaj pohybuje podobným způsobem. Do 7,5% CF ve filamentu hodnota Youngova modulu stoupá až ke svému maximu (PLA = 2,4 GPa; ABS = 2,5 GPa). Při 10% CF náhle klesá. Ze studie [21] vychází najevo, že za to může zvýšená pórovitost způsobená kompozitními vlákny v samotném materiálu. Ze zpracovaných výzkumů vychází průměrné zlepšení pevnosti v tahu od čistého filamentu až o 50%. Největší zlepšení pak lze vidět u materiálu PLA, které po přidání 5% CF získává až o 89% lepší pevnost v tahu. Analýzou získaných hodnot lze dojít k závěru, že uhlíková vlákna mají značný vliv na pevnost v tahu a Youngův modul, ovšem výrazně snižují tažnost, houževnatost a mez kluzu. Skelné vlákno bylo použito jen v práci [24] pro materiál PEEK. Pevnost v tahu se oproti základnímu filamentu výrazně nezměnila, ovšem výsledná pevnost v ohybu se zvýšila o 17%.

Výzkumné instituce se poslední dobou aktivně snaží najít náhradu pro uhlíkové, skelné a jiné vlákna přidávané k čistému filamentu. Z ekologického hlediska existuje spousta potenciálně vhodných kandidátů, jako jsou například vlákna ze dřeva [46], bambusu [47], sisalu a jiných rostlinných vláken.



Graf 3-2: Srovnání přetržení řešených filamentů

V grafu 3-2 se řeší prodloužení testovaných vzorků při přetržení. Z prvního pohledu lze říci, že hodnoty většiny filamentů se liší jen v několika jednotkách. Filamenty jako jsou Nylon, Pet/G, ASA nebo PC byly vytvořeny jako flexibilní, a proto se hodnoty prodloužení výrazně liší od většiny. Ze studie [24] se zjistilo, že většina kompozitních materiálů má po zkoušce v tahu křehký lom. To je způsobeno vnitřní vazbou vláken filamentu, kdy kompozitní vlákna brání

v uspořádání polymerních řetězců. Ve studii [48] zjistili, že hodnota prodloužení při přetržení u 3D tisku je nižší ve srovnání se vzorky vyrobeného pomocí vstřikování. V grafu není zobrazen filament TPE, který se používá především pro měkké výrobky a hodnota přetržení překračuje 500%.

Dosavadní výzkumné práce se zabývaly především pevnostní charakteristikou materiálů. Pro lepší výsledky budoucích prací by bylo vhodné vytvořit obecný postup, kterým by se instituce mohly řídit, počínaje stejným testovaným vzorkem se stejnou geometrií tisku (přímočarý tisk, mřížkovaný tisk,...), procentem vyplnění a taky zkouškami vzorků. Velkým nedostatkem jsou neřešené vlastnosti v oblasti ohybu (pevnost, modul), kdy se jen část studií tímto problémem zabývá.

ZÁVĚR

Cílem předložené práce bylo shrnutí relevantních výzkumných prací a vytvoření přehledného dokumentu používaných filamentů pro FDM / FFF 3D tisk podle společných charakteristik. V předložené práci se autor zabývá mechanickými vlastnostmi, jako jsou pevnost v tahu, pevnost v ohybu nebo Youngův modul testovaných filamentů. Všechna data jsou přebrána z akademických výzkumů, která jsou dále zpracována a rozdělena do tabulek pro jednodušší výběr vhodného materiálu pro 3D tisk.

Rešeršní část bakalářské práce byla věnována rozboru aditivních technologií a přehledu metod 3D tisku se zaměřením na metodu FDM/FFF. V další části byly rozebrány mechanické zkoušky prováděné při testování nových filamentů určených pro tisk. Dále jsou představeny jednotlivé druhy filamentů a jejich kompozitní materiály. Veškeré zpracované filamenty jsou rozděleny do jednotlivých tabulek podle jejich mechanických vlastností.

Hlavním cílem práce byla analýza a porovnání vlastností jednotlivých filamentů. Práce se skládá z 8 filamentů a jejich kompozitních materiálů. Ze zpracovaných informací lze tvrdit, že uhlíkové a skelné vlákna přidané k čistému materiálu zlepšují jak pevnosti v ohybu, tak v tahu. Z pokročilejších materiálů pro FDM tisk vyniká PEEK, který se díky jeho vlastnostem v posledních letech začíná více využívat v oblasti automobilního průmyslu a robotiky.

Tato práce přináší v oblasti aditivní výroby jednodušší vyhledávání pokročilých materiálů pro FDM/FFF tisk, rozřazené podle základních mechanických vlastností. Získané informace mohou být využity jako stavební kámen pro budoucí výzkum zabývající se pokročilými filamenty.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ŠKOP, Martin. *Stavba 3D tiskárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií, 2015. ISBN 88397.
- [2] 3D Hubs. *Knowledge base* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: www.3dhubs.com/knowledge-base/
- [3] TEREKHINA, Svetlana, Innokentiy SKORNYAKOV, Tatiana TARASOVA a Sergei EGOROV. Effects of the Infill Density on the Mechanical Properties of Nylon Specimens Made by Filament Fused Fabrication. *Technologies* [online]. 2019, **7**(3), 1-11 [cit. 2021-4-24]. ISSN 2227-7080. Dostupné z: doi:10.3390/technologies7030057
- [4] CALIGNANO, Flaviana, Massimo LORUSSO, Ignanio ROPPOLO a Paolo MINETOLA. Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing. *Machines* [online]. 2020, **8**(3) [cit. 2021-5-15]. ISSN 2075-1702. Dostupné z: doi:10.3390/machines8030052
- [5] WU, Wenzheng, Peng GENG, Guiwei LI, Di ZHAO, Haibo ZHANG a Ji ZHAO. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials* [online]. 2015, **8**(9), 5834-5846 [cit. 2021-5-15]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma8095271
- [6] SHOFNER, M. L., K. LOZANO, F. J. RODRÍGUEZ-MACÍAS a E. V. BARRERA. Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2003, **89**(11), 3081-3090 [cit. 2021-5-15]. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.12496
- [7] QUILL, Tyler J., Matthew K. SMITH, Tony ZHOU, Mohamed Gamal Shafik BAILOUMY, Joao Paulo BERENGUER, Baratunde A. COLA, Kyriaki KALAITZIDOU a Thomas L. BOUGHER. Thermal and mechanical properties of 3D printed boron nitride – ABS composites. *Applied Composite Materials* [online]. 2018, **25**(5), 1205-1217 [cit. 2021-5-15]. ISSN 0929-189X. Dostupné z: doi:10.1007/s10443-017-9661-1
- [8] 3Dinsider. *3Dinsider* [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/flexible-tpe-filament/>
- [9] GENG, Yi, Hui HE, Hao LIU a Huaishuai JING. Preparation of polycarbonate/poly(lactic acid) with improved printability and processability for fused deposition modeling. *Polymers for Advanced Technologies* [online]. 2020, **31**(11), 2848-2862 [cit. 2021-5-15]. ISSN 1042-7147. Dostupné z: doi:10.1002/pat.5013
- [10] *Simplify3D* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polycarbonate/>
- [11] CARLOTA, V. 3Dnatives. *3Dnatives* [online]. 2020 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/polycarbonate-pc-for-3d-printing-110220204/>
- [12] PrusaPrinters. *PrusaPrinters* [online]. [2021] [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/en/materials>

-
- [13] STRÍTESKÝ, O. Blog.Prusaprinters. *BlogPrusa* [online]. 2019 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://blog.prusaprinters.org/asa-prusament-is-here-learn-everything-about-the-successor-to-abs-30636/>
- [14] KHABIA, Sunil, K.K. JAIN, Hao LIU, Huaishuai JING a Sunil. Comparison of mechanical properties of components 3D printed from different brand ABS filament on different FDM printers. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, **26**(11), 2907-2914 [cit. 2021-5-15]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.02.600
- [15] JuggerBot3D. *JuggerBot3D* [online]. Ohio [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://juggerbot3d.com/materials/>
- [16] 3D Printed High Load Linear Actuator. *Pinshape* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://pinshape.com/items/7850-3d-printed-3d-printed-high-load-linear-actuator>
- [17] Přehled technologií 3D tisku. *Dk metal* [online]. 2018 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [18] 3D Printing technologies. *Eliezeraganon* [online]. 2017 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://eliezeraganon.wordpress.com/2017/07/05/3d-printing-technologies/>
- [19] ČÁSLAVSKÝ, František. *Zkoušky vybraných vlastností materiálů pro 3D tisk* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/177751>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal.
- [20] CAMARGO, José C., Álisson R. MACHADO, Erica C. ALMEIDA a Erickson Fabiano Moura Sousa SILVA. Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, **103**(5-8), 2423-2443 [cit. 2021-5-15]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-03532-5
- [21] NING, Fuda, Weilong CONG, Jingjing QIU, Junhua WEI a Shiren WANG. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2015, **80**, 369-378 [cit. 2021-5-15]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2015.06.013
- [22] ABSi. *Stratasys* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/absi>
- [23] HU, Chao, Winson NG Joon HAU, Weiqi CHEN a Qing-Hua QIN. The fabrication of long carbon fiber reinforced polylactic acid composites via fused deposition modelling: Experimental analysis and machine learning. *Journal of Composite Materials* [online]. 2021, **55**(11), 1459-1472 [cit. 2021-5-15]. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998320972172
- [24] WANG, Peng, Bin ZOU, Shouling DING, Chuazhen HUANG, Zhenyu SHI, Yongsheng MA a Peng YAO. Preparation of short CF/GF reinforced PEEK composite filaments and their comprehensive properties evaluation for FDM-3D printing. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2020, **198** [cit. 2021-5-15]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2020.108175
-

- [25] PENG, Chunzheng a Xuezhen LI. The Mechanical Properties of PEEK/CF Composites Reinforced With ZrO₂ Nanoparticles. *Mechanics of Composite Materials* [online]. 2014, **49**(6), 679-684 [cit. 2021-5-15]. ISSN 0191-5665. Dostupné z: doi:10.1007/s11029-013-9384-9
- [26] MatWeb. [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8d78f3cfc6b6f49d595896ce6ce6a2ef1&ckck=1>
- [27] Stratasys Materials. *Stratasys* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials>
- [28] MaterialPro TPE. *MaterialPro 3D* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/flex-test/>
- [29] Tvrdost pryže. *Gumex* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/blog/jak-se-zjistuje-tvrdost-pryzi-132>
- [30] LATKO-DURALEK, Paulina, Kamil DYDEK, Emila GOLONKO a Anna BOCZKOWSKA. Mechanical Properties of PETG Fibres and Their Usage in Carbon Fibres/Epoxy Composite Laminates. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* [online]. 2018, **26**(2(128)), 61-65 [cit. 2021-5-15]. ISSN 1230-3666. Dostupné z: doi:10.5604/01.3001.0011.5740
- [31] ASA Turbine. *Thingiverse* [online]. 2018 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:2851306>
- [32] PĂCURAR, Răzvan, Ancuța PĂCURAR a Adrian RADU SEVER. Research on the Influence of the Orientation of Deposited Material on the Mechanical Properties of Samples Made from ABS M30 Material Using the 3D Printing Method. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2015, **809-810**, 429-434 [cit. 2021-5-15]. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.429
- [33] HAZER, Seda, Meral COBAN a Ayse AYTAÇ. A study on carbon fiber reinforced poly(lactic acid)/polycarbonate composites. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2018, **135**(48) [cit. 2021-5-15]. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.46881
- [34] VINAYAS, M, SJ ATHUL, D HARURSAMPATH a T NGUYEN THOI. Experimental evaluation of the mechanical and thermal properties of 3D printed PLA and its composites. *Materials Research Express* [online]. 2019, **6**(11) [cit. 2021-5-17]. ISSN 2053-1591. Dostupné z: doi:10.1088/2053-1591/ab43ab
- [35] BAEK, Yeong-Min, Pyeong-Su SHIN, Jong-Hyun KIM, Ha-Seung PARK, Dong-Jun KWON, K. Lawrence DEVRIES a Joung-Man PARK. Investigation of Interfacial and Mechanical Properties of Various Thermally-Recycled Carbon Fibers/Recycled PET Composites. *Fibers and Polymers* [online]. 2018, **19**(8), 1767-1775 [cit. 2021-5-17]. ISSN 1229-9197. Dostupné z: doi:10.1007/s12221-018-8305-x
- [36] Azom Nylon. *Azom* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=442>

- [37] Multi jet fusion materials. *Multi Jet Fusion* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.forecast3d.com/materials/mjf>
- [38] HODZIC, Damir a Adi PANDZIC. Influence of Carbon Fibers on Mechanical Properties of Materials in FDM Technology. *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium 2019* [online]. DAAAM International Vienna, 2019, 2019, , 0334-0342 [cit. 2021-5-18]. DAAAM Proceedings. ISBN 9783902734228. Dostupné z: doi:10.2507/30th.daaam.proceedings.044
- [39] WARNUNG, Lukas, Sarah-Jane ESTERMANN a Andreas REISINGER. Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing Materials. *RT Journal* [online]. 2018, **15** [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.rtejournal.de/ausgabe-15-2018/4781>
- [40] Mechanical and Thermal Properties of Fdm Parts Manufactured with Polyamide 12. *Materials Science* [online]. 2015, , 1-14 [cit. 2021-5-19]. 34735973. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Mechanical-and-Thermal-Properties-of-Fdm-Parts-with-Knoop-Schöppner/300a185d25e84feb84730d80116e74279a2ebdf8>
- [41] Pruša filaments. *Prusa Knowledge Base* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/en/materials>
- [42] Omnexus. *Omnexus* [online]. 2016 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetheretherketone-peek-thermoplastic#uses>
- [43] POPESCU, Diana, Aurelian ZAPCIU, Catalin AMZA, Florin BACIU a Rodica MARINESCU. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing* [online]. 2018, **69**, 157-166 [cit. 2021-5-20]. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2018.05.020
- [44] MOHAN, N., P. SENTHIL, S. VINODH a N. JAYANTH. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2017, **12**(1), 47-59 [cit. 2021-5-20]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2016.1274490
- [45] WACH, Radoslaw A., Piotr WOLSZCZAK a Agnieszka ADAMUS-WLODARCZYK. Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing. *Macromolecular Materials and Engineering* [online]. 2018, **303**(9) [cit. 2021-5-21]. ISSN 14387492. Dostupné z: doi:10.1002/mame.201800169
- [46] LIU, Zhaobing, Qian LEI a Shuaiqi XING. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2019, **8**(5), 3741-3751 [cit. 2021-5-21]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2019.06.034
- [47] DEPUYDT, Delphine, Michiel BALTHAZAR, Kevin HENDRICKX, Wim SIX, Eleonora FERRARIS, Frederik DESPLENTERE, Jan IVENS a Aart W. VAN VUURE. Production and characterization of bamboo and flax fiber reinforced polylactic acid filaments for fused deposition modeling (FDM). *Polymer Composites* [online]. 2018, **40**(5), 1951-1963 [cit. 2021-5-21]. ISSN 0272-8397. Dostupné z: doi:10.1002/pc.24971

- [48] LAY, Makara, Nuur Laila Najwa THAJUDIN, Zuratul Ain Abdul HAMID, Arjulizan RUSLI, Muhammad Khalil ABDULLAH a Raah Khimi SHUIB. Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **176** [cit. 2021-5-21]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.107341
- [49] THOMPSON, Mary Kathryn, Giovanni MORONI, Tom VANEKER, et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals* [online]. 2016, **65**(2), 737-760 [cit. 2021-5-21]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2016.05.004
- [50] GRABOWIK, Cezary, Krzysztof KALINOWSKI, Grzegorz ĆWIKŁA, et al. Tensile tests of specimens made of selected group of the filament materials manufactured with FDM method: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2017, **112**(2), 737-760 [cit. 2021-5-21]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201711204017
- [51] LIN, Leyu, Nicholas ECKE, Miaozi HUANG, et al. Impact of nanosilica on the friction and wear of a PEEK/CF composite coating manufactured by fused deposition modeling (FDM): Trends, opportunities, considerations, and constraints. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **177**(2), 737-760 [cit. 2021-5-21]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.107428
- [52] WANG, Peng, Bin ZOU, Shouling DING, et al. Modeling of surface roughness based on heat transfer considering diffusion among deposition filaments for FDM 3D printing heat-resistant resin: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2019, **161**(2), 737-760 [cit. 2021-5-21]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114064
- [53] BRENKEN, Bastian, Eduardo BAROCIO, Anthony FAVALORO, et al. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **21**(2), 1-16 [cit. 2021-5-21]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.01.002
- [54] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, **143**, 172-196 [cit. 2021-5-21]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

2D	Dvoudimenzionální
3D	Třidimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AM	Additive Manufacturing
ASA	Akrylonitril-styren-akryl
BJ	Binder jetting
CAD	Computer aided design
CF	Carbon fibers
DV	Dřevěné vlákno
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
GF	Glass fibers
HV	Hliníkové vlákno
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
MV	Měděné vlákno
Nylon	Obchodní název pro Polyamid
PC	Polykarbonát
PEEK	PolyEtherEtherKetone
PET	Polyethylentereftalát
PET-G	Polyethylentereftalát glykol
PLA	Polyactid acid
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
TPE	Termoplastický elastomer
VGCF	Vapor-grown carbon fibers

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1) Přehled technologií [18]	12
Obr. 2-2) Funkce FDM tiskárny [17]	14
Obr. 2-3) Úhel rastru u 3D tisku [5]	15
Obr. 2-4) Tabulka tvrdosti a příklady použití [29]	16
Obr. 2-5) Zkušební vzorek „Dog-bone“ [23]	16
Obr. 2-6) Souřadný systém testovaného vzorku [23]	17
Obr. 2-7) Vyplnění vzorku [7]	17
Obr. 2-8) Pevnost v tahu ABS + VGCF při různé rotaci [5]	19
Obr. 2-9) ASA komponenty domácí větrné turbíny [31]	20
Obr. 2-10) Porovnání tahových vlastností nylonových filamentů [4]	23
Obr. 2-11) Pevnost v tahu v závislosti na druhu filamentu [24]	25
Obr. 2-12) Drsnost povrchu [24]	25

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled 3D technologií [1]	13
Tabulka 2: Pro a proti filamentu ABS	18
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti ABS	19
Tabulka 4: Pro a proti filamentu ASA	20
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti ASA	21
Tabulka 6: Pro a proti filamentu PLA	21
Tabulka 7: Mechanické vlastnosti PLA	22
Tabulka 8: Pro a proti filamentu Nylon	23
Tabulka 9: Mechanické vlastnosti Nylonu	24
Tabulka 10: Pro a proti filamentu PEEK	24
Tabulka 11: Mechanické vlastnosti PEEK	26
Tabulka 12: Pro a proti filamentu TPE	26
Tabulka 13: Mechanické vlastnosti TPE	27
Tabulka 14: Pro a proti filamentu PET/PET-G	27
Tabulka 15: Mechanické vlastnosti PET/PET-G	27
Tabulka 16: Pro a proti filamentu PC	28
Tabulka 17: Složení zkušebních vzorků	28
Tabulka 18: Mechanické vlastnosti PC	29

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Doporučené informace k tisku